



Dispositif de protection d'un régulateur de tension série mettant en œuvre un transformateur de couplage à entrefer virtuel

Virginie Majchrzak

► To cite this version:

Virginie Majchrzak. Dispositif de protection d'un régulateur de tension série mettant en œuvre un transformateur de couplage à entrefer virtuel. Journées JCGE'2014 - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. hal-01083914

HAL Id: hal-01083914

<https://hal.science/hal-01083914>

Submitted on 18 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Dispositif de protection d'un régulateur de tension série mettant en œuvre un transformateur de couplage à entrefer virtuel

Virginie Majchrzak

Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France
UArtois, LSEE, F-62400 Béthune, France
Electricité de France (EDF) R&D, F-92141 Clamart, France
virginie_majchrzak@ens.univ-artois.fr

RESUME – Les régulateurs de tension série, qu'ils soient électromécaniques ou à convertisseurs statiques, constituent une solution pour améliorer la qualité de l'énergie. Cette source d'alimentation variable compense les perturbations de la tension du réseau dans lequel elle est insérée en injectant sa propre tension via un transformateur de couplage. Pour répondre à la problématique de la régulation de tension dans un contexte où l'intensité des courants de défaut peut être élevée, un régulateur de tension à électronique protégée par un entrefer virtuel est proposé. Dans ce cas, l'intégration d'une colonne de retour avec un entrefer virtuel au transformateur de couplage assure la fonction de protection du convertisseur électronique lors de défaut sur le réseau. Le concept d'entrefer virtuel repose sur la saturation locale d'un circuit magnétique dont les effets sont similaires à ceux d'un entrefer mécanique d'épaisseur variable. Cette saturation locale s'apparente donc à un by-pass magnétique qui modifie la circulation du flux dans le transformateur de couplage, selon les modes de fonctionnement.

ABSTRACT – Electromechanic on-load tap changers or power electronics voltage regulators are inserted in transmission and distribution grids to improve power quality. The dynamic voltage restorer is a voltage source inverter connected in series between power supply and critical load. The operating principle is to inject the appropriate voltage required to the load through an injection transformer to compensate voltage distortion. To answer the issue of the voltage regulation with possible high intensity fault currents, a design of a power electronics series voltage regulator with a virtual air gap was proposed. In this case, the addition of a magnetic leakage leg with a virtual air gap in the injection transformer protects the electronic converter. The local saturation of a magnetic circuit in the virtual air gap part is a by-pass which changes the magnetic coupling in the injection transformer and deflects magnetic flux of the electronic converter when a fault occurs.

MOTS-CLES – dynamic voltage restorer, entrefer virtuel, qualité de l'énergie, régulation de la tension, réseau de distribution

1. Introduction

L'utilisation de l'électronique de puissance, la présence de charges non linéaires ou encore l'insertion de la production décentralisée intermittente (éolienne, photovoltaïque) dans le mix énergétique peuvent contribuer à l'apparition de perturbations de la tension dans le réseau de distribution. Celles-ci peuvent également être causées par des démarrages de moteurs, des courts-circuits et des surcharges. Elles se traduisent par des fluctuations de la tension, la présence d'harmoniques ou du "flicker". Elles peuvent également provoquer des dysfonctionnements au niveau des charges sensibles. Plus généralement, les perturbations de la tension peuvent diminuer la qualité de l'énergie et engendrer des pertes économiques.

Pour améliorer la qualité de l'onde de tension, une solution consiste à insérer des régulateurs de tension, connus sous le nom de "Dynamic Voltage Restorers", en série dans le réseau. Ces dispositifs se comportent comme une source de tension variable. Ils peuvent compenser des perturbations de la tension "réseau" en injectant leur propre tension via un transformateur de couplage. Pour assurer le réglage de la tension, il existe également des transformateurs avec changeurs de prises en charge [1], cependant l'avantage des systèmes basés sur des convertisseurs de tension est de pouvoir réguler en temps réel cette dernière en amplitude et en phase, compenser les harmoniques et réduire le "flicker".

Un régulateur de tension est principalement constitué d'un transformateur de couplage, d'une unité de stockage d'énergie et d'un convertisseur de tension. L'enroulement primaire du transformateur est connecté à la phase du réseau et l'enroulement secondaire est relié à la sortie du convertisseur de tension. L'unité de stockage d'énergie (c'est-à-dire le

bus continu du convertisseur de tension) peut être alimentée directement du réseau via un convertisseur shunt ou constituée par une source d'énergie indépendante [2].

Le régulateur de tension série possède trois modes de fonctionnement [3] :

- en l'absence de perturbation de la tension du réseau amont, le régulateur de tension n'injecte aucune tension sur la ligne,
- lors d'une perturbation de la tension du réseau amont, le régulateur de tension injecte alors la tension adéquate pour que la tension au niveau de la charge conserve son évolution initiale,
- lors d'un défaut sur le réseau, le convertisseur électronique du régulateur de tension série doit être protégé pour ne pas être endommagé par les intensités élevées des courants de défauts.

Le convertisseur de tension nécessite donc une protection en cas de défaut "réseau" (court-circuit). Deux solutions sont actuellement envisagées pour protéger le convertisseur et l'unité de stockage contre les surintensités :

- surdimensionner les composants actifs du convertisseur,
- ajouter un by-pass électromécanique en parallèle avec le transformateur de couplage pour dévier les courants de défaut [4].

L'objectif de cet article est de présenter une nouvelle topologie du transformateur de couplage permettant d'optimiser la fonction de protection de l'électronique de puissance en cas de défaut "réseau". Une maquette à l'échelle réduite a été réalisée en monophasé afin de valider le principe de fonctionnement du dispositif magnétique basé sur la mise en œuvre d'un entrefer virtuel [5].

2. Transformateur de couplage avec entrefer virtuel

2.1 Architecture du transformateur de couplage

Pour assurer la fonction de protection du convertisseur de tension, une colonne de retour comprenant au moins une paire de trous est ajoutée au transformateur de couplage classique [6] (Figure 1). L'enroulement primaire est connecté en série à une phase du réseau de distribution, l'enroulement secondaire est relié à la sortie du convertisseur de tension et l'enroulement auxiliaire, bobiné autour de la paire de trous, est alimenté par une source DC.

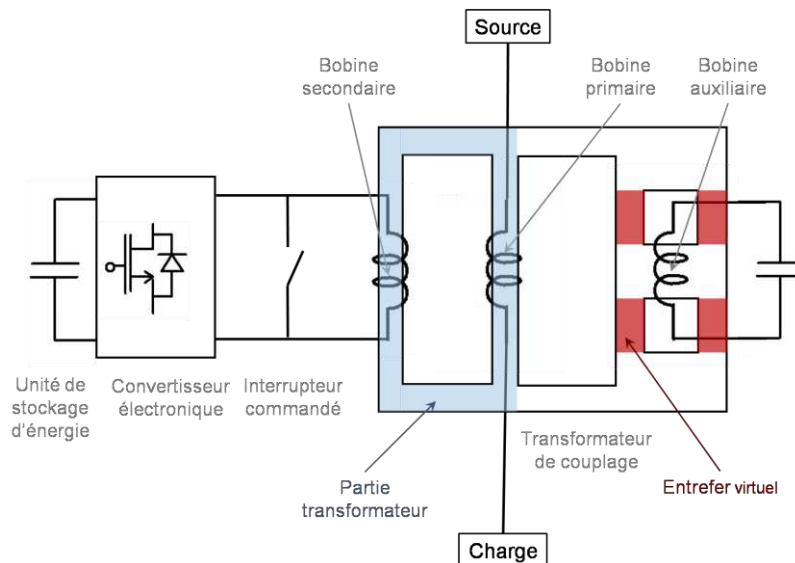


Figure 1 : Architecture du transformateur de couplage

2.2 Principe de l'entrefer virtuel

L'entrefer virtuel [7 - 8] est une zone du circuit magnétique dans lequel une ou plusieurs paires de trous (fenêtres de bobinage) ont été usinées pour loger les enroulements auxiliaires (Figure 2). Les lignes de champ circulant autour des trous permettent de saturer localement le circuit magnétique. L'entrefer virtuel est donc équivalent à un entrefer mécanique [9] dont l'épaisseur est variable et dépend de l'intensité du courant continu parcourant le (les) enroulement(s) auxiliaire(s) et de l'intensité du courant alternatif circulant dans l'enroulement primaire.

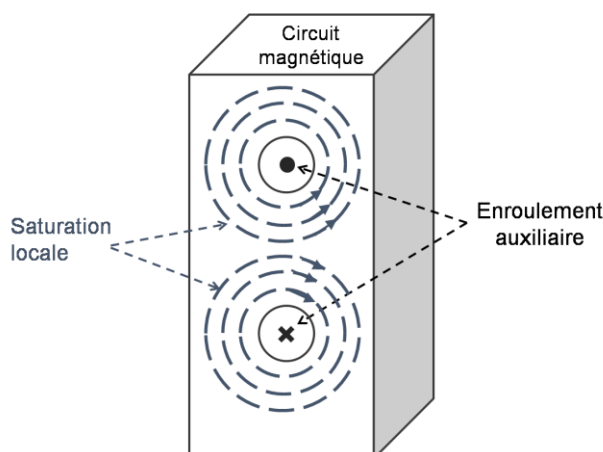


Figure 2 : Entrefer virtuel - Saturation locale du circuit magnétique

Dans le cadre du transformateur de couplage, l'entrefer virtuel réalisera, en cas de défaut "réseau", la fonction de by-pass magnétique en modifiant la circulation du flux généré par l'enroulement primaire. En effet, l'état magnétique de l'entrefer virtuel est modifié par la combinaison des lignes de champ alternatif et continu circulant dans la colonne de retour. Ainsi, en fonctionnement normal l'entrefer virtuel est saturé par le flux continu afin d'éviter la circulation des lignes de champ alternatif dans la colonne de retour. En contrepartie, lorsque le flux magnétique généré par le courant de phase – c'est-à-dire circulant dans l'enroulement primaire - devient trop élevé, les lignes de champ alternatif sont déviées dans la colonne de retour. L'entrefer virtuel peut ainsi être assimilé à une inductance de fuites variable dont la valeur dépend du courant primaire et du courant continu.

2.3 Fonctionnement du transformateur de couplage

Un modèle éléments finis du transformateur de couplage a été réalisé avec FEMM. Il permet d'observer la distribution du flux magnétique lors des différents modes de fonctionnement.

En régime normal, l'amplitude des lignes de champ alternatif circulant dans la dans la colonne de retour est inférieure à l'amplitude des lignes de champ continu. L'entrefer virtuel est fortement saturé, par conséquent, le flux magnétique généré par l'enroulement primaire se referme par la colonne secondaire (Figure 3). Les enroulements principaux sont ainsi magnétiquement couplés et l'inductance de fuites est faible.

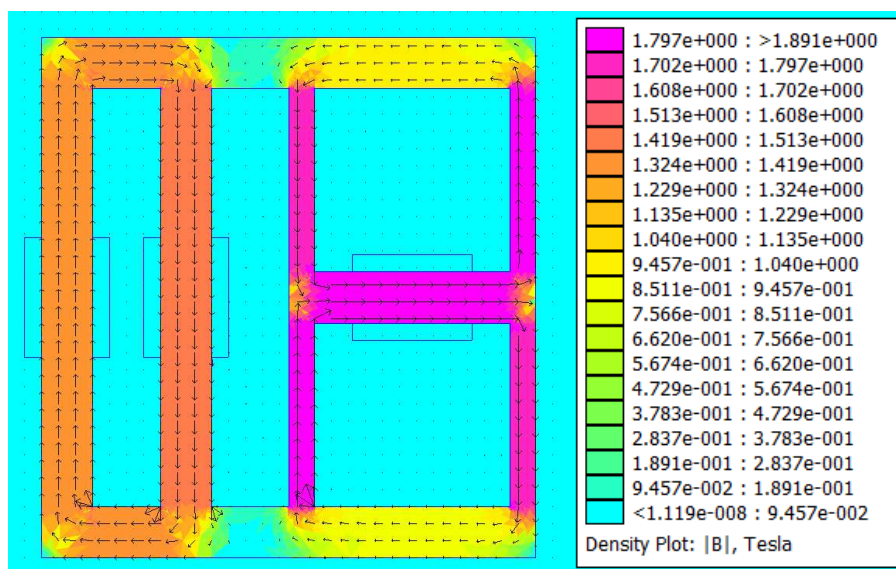


Figure 3 : Fonctionnement en régime normal

En cas de défaut, le convertisseur électronique connecté aux bornes de l'enroulement secondaire doit être protégé des courants de fortes intensités. La fermeture de l'interrupteur commandé situé entre le convertisseur de tension et l'enroulement secondaire, assure la mise en court-circuit de ce dernier (Figure 1). Deux stratégies d'alimentation de l'enroulement auxiliaire, lors d'un défaut, sont envisagées : maintenir l'intensité du courant continu constante ou annuler le courant continu à la détection d'un défaut. L'augmentation du courant primaire entraîne la saturation de la partie "transformateur". La réluctance de la colonne de retour est alors plus élevée que celle de la colonne secondaire.

Le flux magnétique généré par le bobinage primaire est par conséquent dévié dans la colonne de retour. Les enroulements principaux sont magnétiquement découplés. L'entrefer virtuel est ainsi désaturé (Figure 4) et l'inductance de fuites est plus élevée.

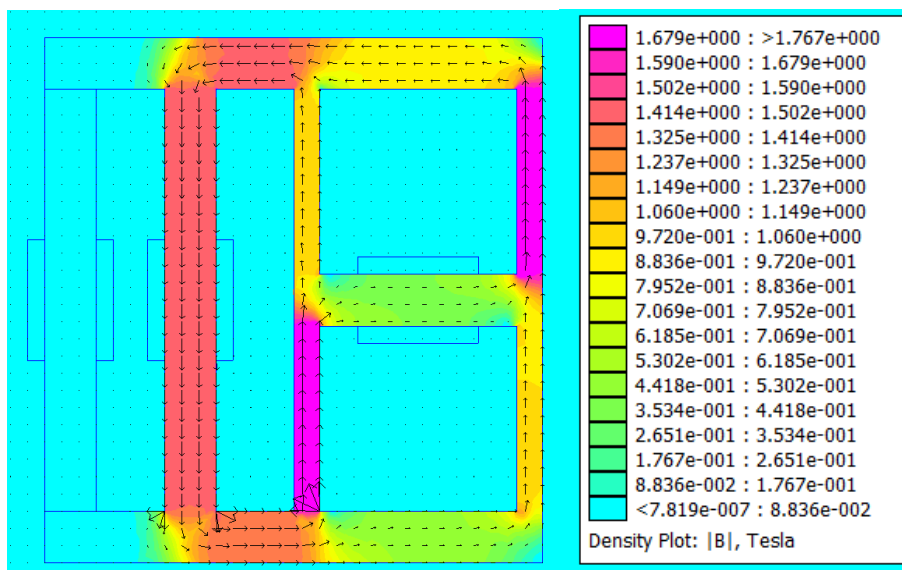


Figure 4 : Fonctionnement en cas de défaut

3. Dispositif expérimental

3.1 Maquette à l'échelle réduite du transformateur de couplage

Une maquette à l'échelle réduite a été réalisée pour valider le principe de fonctionnement de l'entrefer virtuel en tant que by-pass magnétique (Figure 5).

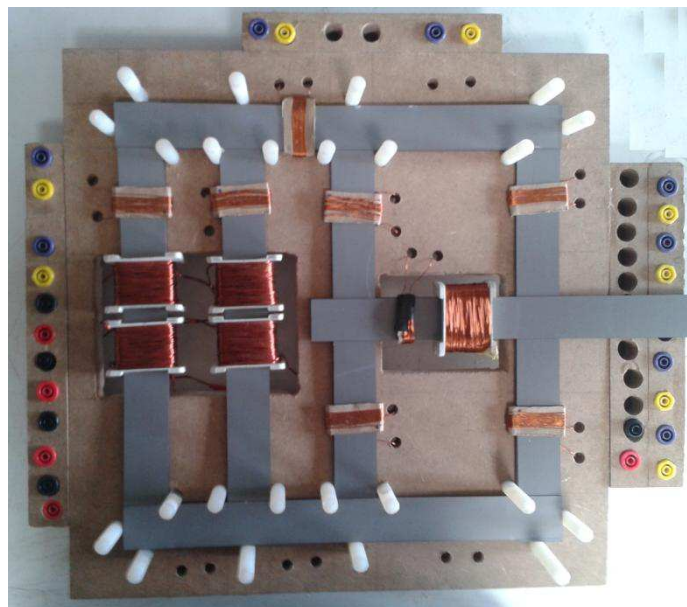


Figure 5 : Maquette à l'échelle réduite du transformateur de couplage

Le circuit magnétique de la maquette a été réalisé avec des bandes d'Epstein superposées par double recouvrement, selon le principe d'empilement des tôles sur un cadre d'Epstein [8]. La colonne de retour comporte une paire de fenêtres et le bobinage auxiliaire. Les branches verticales de cette dernière comportent deux fois moins de tôles magnétiques afin de pouvoir saturer l'entrefer virtuel avec un courant continu de faible intensité.

En ce qui concerne les bobines, le nombre de spires de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire sont égaux. Le rapport de transformation de la partie "transformateur" est ainsi unitaire. Le nombre de spires de l'enroulement auxiliaire a été déterminé pour que l'entrefer virtuel soit saturé en fonctionnement normal. Des spires

exploratrices ont été bobinées autour du circuit magnétique pour observer la circulation du flux dans les différentes jambes.

Les caractéristiques de la maquette sont résumées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques de la maquette du transformateur de couplage

Dimensions des bandes d'Epstein GO35	30.5 cm * 3 cm * 0.35 mm
Dimensions du circuit magnétique	30.5 cm * 30.5 cm * 7 mm
Nombre de spires de l'enroulement primaire et secondaire	120 (deux bobines de 60 spires en série)
Nombre de spires de l'enroulement auxiliaire	750
Tension maximale aux bornes de l'enroulement primaire	15 V
Courant maximal dans l'enroulement primaire	10 A
Courant maximal dans l'enroulement auxiliaire	0.5 A DC

3.2 Résultats expérimentaux

Le principe de fonctionnement de l'entrefer virtuel a été observé dans le cas où la tension injectée par le régulateur de tension est nulle et l'enroulement secondaire est mis en court-circuit par la fermeture de l'interrupteur commandé. Ce montage permet de comprendre le comportement magnétique de l'entrefer virtuel et d'observer la limitation du courant dans l'enroulement secondaire en fonction de l'intensité de la ligne.

En fonctionnement normal, l'amplitude des lignes de champ alternatif dans la colonne de retour est plus faible que l'amplitude des lignes de champ continu. L'enroulement secondaire étant en court-circuit, la partie "transformateur" se comporte comme un transformateur de courant. L'entrefer virtuel est saturé et les enroulements principaux sont fortement couplés. Lors d'un défaut, l'amplitude des lignes de champ alternatif dans la colonne de retour devient plus élevée que celle des lignes de champ continu, annihilant ainsi les effets de saturation locale du circuit magnétique. Une grande partie du flux magnétique généré par l'enroulement primaire est dévié dans l'entrefer virtuel. Par conséquent, Le couplage magnétique entre les enroulements principaux est réduit et le courant dans l'enroulement secondaire est écrêté. L'entrefer virtuel permet ainsi, un couplage/découplage magnétique "naturel" entre les enroulements principaux du transformateur (Figure 6).

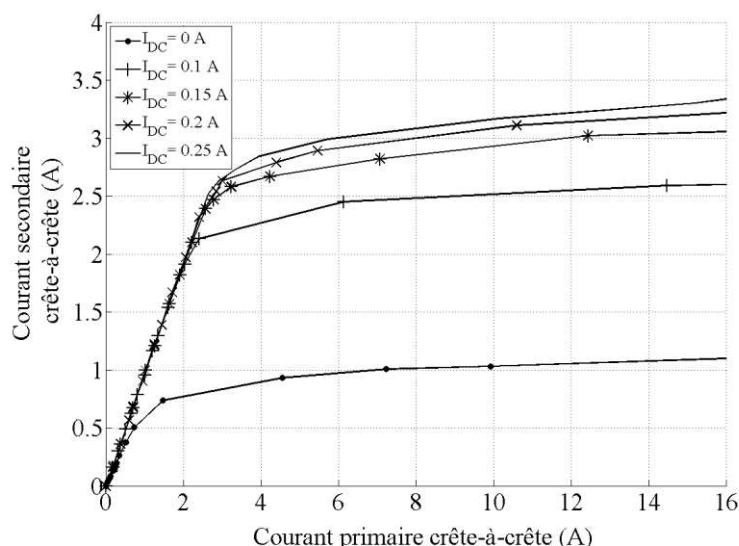


Figure 6 : Couplage et découplage magnétique en fonction de l'intensité du courant dans l'enroulement primaire

Le contrôle de la saturation de l'entrefer virtuel par l'intensité du courant continu permet de modifier la circulation du flux dans le circuit magnétique. L'augmentation de l'intensité du courant continu accentue la saturation de l'entrefer virtuel. Le couplage magnétique entre les enroulements principaux est alors plus élevé et le courant dans l'enroulement secondaire est moins écrêté (Figure 7). La limitation du courant parcourant le convertisseur électronique lors d'un défaut "réseau" est ainsi assurée par le contrôle de la saturation de l'entrefer virtuel.

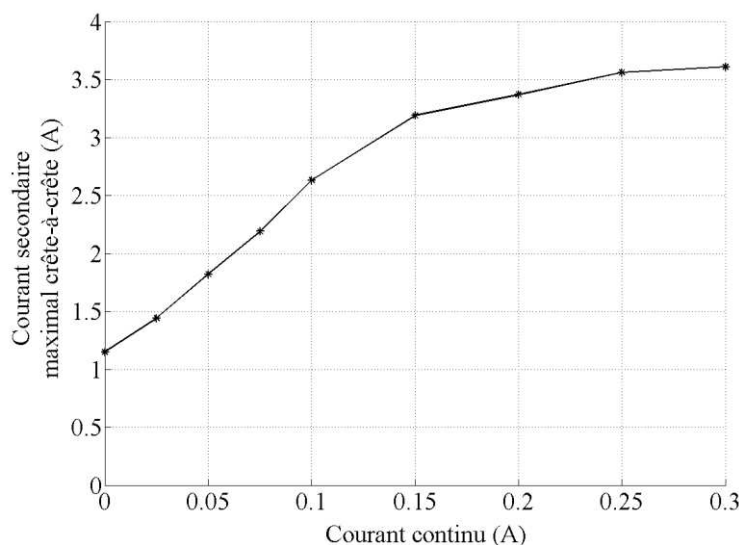


Figure 7 : Influence du courant continu sur la saturation de l'entrefer virtuel

L'entrefer virtuel permet de reproduire le fonctionnement d'un transformateur avec une colonne de retour de réluctance variable (Figure 8). Lorsque l'entrefer virtuel est saturé, la perméabilité de la colonne de retour est quasiment égale à celle de l'air. La réluctance du circuit magnétique est élevée. L'augmentation de l'amplitude des lignes de champ alternatif circulant dans la colonne de retour modifie l'état magnétique de l'entrefer virtuel. La perméabilité de la colonne de retour augmente et la réluctance du circuit magnétique diminue.

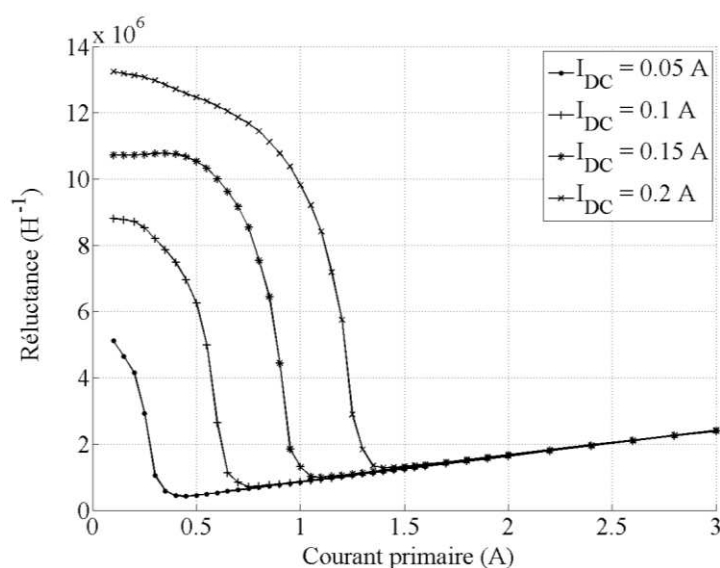


Figure 8 : Comportement magnétique du transformateur de couplage avec l'entrefer virtuel

4. Conclusion

Les régulateurs de tension série avec des convertisseurs électroniques sont utilisés dans les réseaux de transport et de distribution pour améliorer la qualité de l'énergie. Dans ces dispositifs, la protection du convertisseur électronique est assurée par un by-pass électromécanique en parallèle avec le transformateur de couplage qui dévie les courants de défaut. Le régulateur de tension série à électronique protégée par un entrefer virtuel permet de coupler en série un convertisseur électronique pour réguler la tension en régime normal de charge et de découpler le convertisseur pour le protéger pendant les régimes transitoires dangereux.

Les essais réalisés sur une maquette à l'échelle réduite du transformateur de couplage ont mis en évidence l'action de l'entrefer virtuel sur la circulation du flux magnétique dans le transformateur de couplage. Lorsque l'intensité des courants de défaut est trop élevée, le flux magnétique généré par l'enroulement connecté à la phase du réseau électrique est dévié dans la colonne de retour. Le convertisseur électronique est ainsi protégé. La saturation de l'entrefer virtuel est

contrôlée par l'intensité du courant continu parcourant le bobinage auxiliaire. Le transformateur de couplage est ainsi équivalent à un transformateur en série avec une inductance de fuites variable.

Un prototype basse tension du régulateur de tension est en développement et des essais pour lesquels le démarrage d'un moteur sera utilisé pour perturber la tension et simuler des régimes transitoires de défaut, seront menés pour valider le principe de fonctionnement du régulateur de tension série à électronique protégée par un entrefer virtuel.

5. Remerciements

Cette étude entre dans le cadre du pôle MEDEE (Maîtrise Energétique des Entrainements Electriques), opération MEDEE 3.6 "REgulateur MAGnétique à haute fiabilité pour améliorer la qualité de la tension d'un réseau de distribution (REMA)", elle est cofinancée par EDF R&D, la région Nord-Pas de Calais, l'état et les fonds européens FEDER.

6. Références

- [1] <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/transformers/distribution-transformers/fit-former-reg.htm>, (15 mars 2014)
- [2] J.G. Nielsen, "Design and Control of a Dynamic Voltage Restorer", (2002).
- [3] A. Ghosh, G. Ledwich, "Compensation of distribution system voltage using DVR" *IEEE Trans on Power Delivery*, Vol. 17, pp. 1030 - 1036, (2002).
- [4] <http://www.abb.com/product/seitp322/e039976253ee76f8c12576f600410658.aspx>, (15 mars 2014)
- [5] V. Molcrette, J.L. Kotny, J.P. Swan, J.F. Brudny, "Reduction of inrush current in single phase transformer using virtual air gap technique", *IEEE Trans on Magnetics*, Vol. 34, pp. 1192 - 1194, (1998).
- [6] P. Guuinic, J.F. Brudny, V. Costan, M. Dessoude, "Régulateur de tension série à électronique protégée des courts-circuits par un découplage par circuit magnétique à trous et fenêtres", (2011)
- [7] E. Melgoza, J. Avila Montes, M. Madrigal, "Analysis of the magnetic characteristics of virtual-gap reactors", *2013 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing*, (2013).
- [8] "Matériaux magnétiques – Partie 2 : Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des bandes et tôles magnétiques en acier au moyen d'un cadre Epstein", Norme internationale IEC 60404-2, (2008)